

УДК 553.493.5:552.331.4

ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В РАСПЛАВАХ И ОСОБЕННОСТИ ЕГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

А.Ф. Коробейников, А.И. Гусев*

Томский политехнический университет

E-mail: lev@tpu.ru

*Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина, г. Бийск

E-mail: anzerg@mail.ru

Приведены данные по поведению золота в расплавах различной кремнекислотности. На основании авторских данных и результатов других исследователей намечен основной термодинамический и петрологический механизм поведения золота в расплавах. Установлена важная роль смены режима окисленности-восстановленности расплавов. Отмечена роль коэффициента разделения элементов при эволюции и фракционировании расплавов. Более предпочтительна ассоциация крупных и гигантских месторождений золота с восстановленными магмами, сформировавшимися в процессе контаминации углеродистым коровым материалом родоначальных мантийных базальтоидных магм.

Ключевые слова:

Поведение золота, петрология магматизма, геохимия, флюидный режим, рудоносность, мантийно-коровое взаимодействие, фракционирование, расплав, магнетит, сульфиды меди и железа, золото.

Key words:

Behavior of gold, petrology of magmatism, geochemistry, fluid regime, ore mineralization, mantle-crust interaction, fractionation, melt, magnetite, sulfides of copper and iron, gold.

Введение

Проблемы поведения золота и его фракционирования из магматических расплавов наиболее чётко высвечиваются в результате геохимических и экспериментальных работ, которые проводились многими учёными мира. Содержания золота и его распределение в породах и конституционных минералах изверженных горных пород даёт существенную информацию о рудогенерирующем потенциале магм и особенностях поведения золота в ассоциированных золоторудных месторождениях [1–3]. Для выяснения некоторых аспектов поведения золота и его фракционирования по возможности учтены последние данные по обсуждаемой проблеме, имеющей не только фундаментальное, но и прикладное значение, что и определяет актуальность исследования.

Поведение золота в расплавах и особенности его фракционирования

Поведение золота в расплавах определяется многими причинами. В различных термодинамических и физико-химических условиях золото проявляет многообразные свойства, влияющие на его поведение. Золото, в первую очередь, обладает переменной валентностью и в зависимости от этого меняется характер поведения в расплавах. По мнению А.А. Маракушева [4], одновалентное золото по кислотно-щелочным свойствам резко отличается от трёхвалентного, что приводит к образованию отдельных парагенезисов. Кроме того, магматические расплавы в отношении золота оказываются стерильными из-за того, что золото в расплавах имеет высокие координационные числа, а это обуславливает его исключительно слабые связи с кислородом расплава [4].

В работе И.Д. Рябчикова с соавторами [5] на основе экспериментальных данных по растворимости золота при 750...850 °С в хлоридных растворах, равновесных с гранитным расплавом, дан общий физико-химический и термодинамический анализ его поведения в процессе дегазации магм. Показано, что концентрация насыщения гранитного расплава золотом должна достигать $5 \cdot 10^{-4}$ мас. %, а с учётом его реального распределения в гранитоидах $4,5 \cdot 10^{-7}$ мас. % эти породы оказываются недосыщенными металлом примерно в 1000 раз.

Е.Н. Диман и Б.В. Олейников на основе теоретических расчётов степени насыщения растворов при условии растворимости золота в сосуществующих фазах установили, что расплавы, из которых отделяются растворы, не насыщены золотом [6].

А.Ф. Коробейников и А.Г. Миронов обстоятельно рассмотрели поведение золота при дифференциации базальтовых и гранитоидных магм, при формировании различных фаз габброидных и гранитоидных интрузий и фракционирования его в процессе кристаллизации магм различной кремнекислотности. Установлена ведущая роль сульфидизации в становлении рудогенерирующих расплавов в верхней мантии и земной коре [7].

А.Ф. Коробейниковым на основе распределения золота в магматических породах рассчитаны коэффициенты распределения золота K_p^{Au} между жидкой и твёрдой фазами кристаллизующихся расплавов основного и кислого составов. Для толеитовых магм K_p^{Au} оценивается как 1,3:1 в начальную и 2,5:1 в конечную стадию кристаллизации. Для рудогенерирующих гранитоидных магм K_p^{Au} определён как 26:1 в начальную стадию кристаллизации и 5,5:1 в заключительную. Рассчитаны также K_p^{Au} между твёрдыми фазами и флюидами области суб-

солидуса (по содержанию Au в минералах пегматитов, магнезиально-скарновых зон, автометасоматитов). Для толеитовых интрузий K_p^{Au} оценивается как 1:21, а для рудогенерирующих гранитоидных интрузий — как 1:53–1:29. Трансмагматические флюиды также могли транспортировать золото, поскольку при кристаллизации расплавов в промежуточных камерах выявлено 2–5,5-кратное накопление его в продуктах их кристаллизации и установлено его накопление до 1,7–114 раз в минералах магнезиальных скарнов, возникавших ещё в магматический этап. Тем самым подтверждается возникновение золотосодержащих растворов, способных формировать эндогенные месторождения золота [8].

Важное значение в металлогении золота имеет окислительно-восстановительная обстановка расплавов. С. Ишихара обратил внимание на тот факт, что в окислительной обстановке золото присутствует в виде бисульфидных комплексов, а в условиях разной степени окисленности-восстановленности золото может присутствовать в хлоридных комплексах [9]. Предложено разделение интрузивно связанных золоторудных систем на окисленные и восстановленные [10–14], что имеет важное значение, определяющее масштабы оруденения [15].

В порядке понимания роли гранитного магматизма в металлогении золота и других металлов С. Ишихара выделил магнетитовую и ильменитовую серии гранитоидов, основанных на различной фугитивности кислорода (fO_2) в расплаве [9, 16], суммированные в табл. 1.

Таблица 1. Классификационная схема С. Ишихара по [9]

Показатели	Серии гранитоидов	
	Ильменитовая серия	Магнетитовая серия
Фугитивность кислорода в расплаве (fO_2)	Редуцированная (восстановленная)	Окисленная
Соотношения ильменита и магнетита в породах	Ильменита >> магнетита	Магнетита >> ильменита
Первичные отношения в (Fe_2O_3/FeO) гранитоидах	<0,5	>0,5
Контроль фугитивности кислорода (fO_2)	Инкорпорация (контаминация) корового углерода	Диссоциация воды

Согласно этой схеме магнетитовая серия гранитоидов производна из более окисленных расплавов и характеризуется присутствием значительного количества магнетита (более 1 % по объёму). С другой стороны, ильменитовая серия гранитоидов производна из редуцированных расплавов, которые имеют меньшее количество рудных минералов (менее 1 % по объёму), при этом ильменит является преобладающей фазой в породе.

С металлогенической точки зрения С. Ишихарой с соавторами показано, что фугитивность кислорода (fO_2) значительно воздействует на содер-

жание золота в гранитоидных породах. В гранитоидных плутонах Японии среднее содержание золота в породах магнетитовой серии почти в 2 раза выше (4,3 мг/т), чем в ильменитовой (2,5 мг/т) [17]. Такое поведение золота в расплавах может интерпретироваться как совместимое поведение золота в родоначальных расплавах магнетитовой серии гранитоидов и в противоположность этому — как несовместимое поведение золота в расплавах ильменитовой серии гранитоидов.

Как очевидный результат этой интерпретации некоторые исследователи заметили тенденцию плутоно-связанных месторождений золота с более редуцированными интрузивами, относящимися к ильменитовой серии гранитоидов по С. Ишихара [18, 19]. Работами Д. МакКоя и соавторов показано, что плутоны Северной Америки, с которыми ассоциируют плутонически связанные месторождения золота, относятся к гранитоидам ильменитовой серии, обязаны несовместимому поведению золота в редуцированных расплавах [19]. Авторы сравнили содержания золота в трендах дифференциации для золота в благоприятных плутонах (с известными месторождениями — плутон Фэйрбэнк) и для безрудных плутонов (массив Чугач). При этом установлено, что золото позитивно коррелируется с кремнием (Si) в ильменитовой серии плутонов и негативно с кремнием (Si) в магнетитовой серии интрузивов. А.Ф. Коробейников выявил ещё ранее тенденцию аккумуляции золота в аксессуарных минералах поздних дифференциатов некоторых плутонов, подтвердив возможное несовместимое поведение золота и концентрацию его в остаточных расплавах и флюидах [20].

Важное значение имеют катионные радиусы металлов в аксессуарных фазах гранитоидов. По данным Р. Шеннона и К. Превита, катионные радиусы железа и золота разных валентностей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Катионные радиусы железа и золота по [21]

Катионы	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Au^+	Au^{3+}
Радиус (Å)	0,92	0,785	1,46–1,49	0,910

Анализ табл. 2 показывает, что радиус катиона Au^{3+} очень близок к Fe^{2+} , и поэтому трёхвалентное золото должно тяготеть к закисному железу.

Согласно первому правилу Л. Полинга:

$$Au^{3+}R_{\text{катион}}/R_{\text{анион}}=0,910/1,26=0,722 - 6 \text{ координация}$$

$$Fe^{2+}R_{\text{катион}}/R_{\text{анион}}=0,92/1,26=0,730 - 6 \text{ координация}$$

$$Au^+R_{\text{катион}}/R_{\text{анион}}=1,46/1,26=1,159 - 12 \text{ координация}$$

Из приведенного следует, что Au^{3+} может замещать Fe^{2+} в шестерной координации в структурах магнетита и ильменита [22]. Для Au^+ такое замещение невозможно.

Отсюда следует, что в магнетитовой серии расплавов Au^{3+} будет легко замещать Fe^{2+} в магнетите. По этой причине магнетит гранитоидов содержит золота более 1 г/т [18]. Это подтверждено исследованиями А. Миронова и С. Жмодика, которые ис-

пользовали золото-радиоизотопы (Au^{195}), позволившие установить, что золото входит в кристаллическую решётку магнетита, так же как и сульфидов [23]. Кроме того, так как Au^{3+} инкорпорируется в кристаллизующийся магнетит, это обеспечивает окисление Au^+ до Au^{3+} . И если это происходит достаточно долго, то всё золото в расплавах, формирующих магнетитовую серию гранитоидов, будет сконцентрировано в магнетите. Такой сценарий поведения золота в окисленных расплавах не приведёт к концентрации золота в остаточных флюидах и не способствует образованию концентрированного оруденения [22]. Другой сценарий поведения золота наблюдается в расплавах, дающих гранитоиды ильменитовой серии (восстановленные условия), в которых происходит накопление золота в остаточных флюидах, приводящих к формированию концентрированного золотого оруденения.

Доказано экспериментальными данными, что кристаллизация и растворение силикатных минералов в расплавах не имеет значительного воздействия на содержание золота в породообразующих минералах гранитных магм, так как доминирующая часть золота концентрируется в сульфидах. Поведение золота как несовместимого элемента в расплавах приводит к тенденции концентрации его в остаточных расплавах, в которых происходит диссоциация серы.

Особенно ценная информация получена в последнее десятилетие, когда мономинеральные фракции, и особенно сульфиды, стали анализировать прецезионными методами исследования, такими как протонно-наведенный эмиссионный рентгеноспектральный (X-gau) анализ, ионно-пробный и лазерно-абляционный с индуктивно связанной плазмой масс-спектрометрический анализ (LA-ICPMS) [24, 25]. LA-ICPMS позволяет определять гетерогенные расплавные включения в любом минерале-хозяине из изверженной породы и количественно анализировать их состав без предварительной температурной регомогенизации [25–28]. Эти сульфидные минералы первоначально формируют сегрегации несмешивающегося сульфидного расплава, встречающиеся как пирротиновые (PSS), промежуточные (ISS) или борнитовые твёрдые растворы (BSS) из насыщенных серой силикатных расплавов в области субсолидусных процессов (растворением, перекристаллизацией, реакциями с поздними гидротермальными флюидами) [29–32]. Сульфидные включения в магматических фенокристаллах могут обеспечить существенную информацию о ранней и поздней стадиях развития расплава [26].

Многочисленные исследования показали, что магматические сульфидные минералы, представленные в изверженных породах, варьируют по составу. Эти сульфидные минералы обычно встречаются как мельчайшие включения в мафических силикатах (амфиболах, биотитах, пироксенах, мусковитах) и оксидах (например, в магнетите) [29, 31–34]. Экспериментальные исследования по-

казали, что золото сильно селекционируется сульфидными минералами, осаждаемыми из фельзических силикатных расплавов [35–37], подтверждая тем самым, что поведение золота в изверженных системах контролируется сульфидными минералами. Природные системы показывают такое же поведение золота [26, 27]. Состав и физико-химические условия, при которых сера насыщает фельзические расплавы, можно выявить путём экспериментального изучения [38–43], хотя природные системы могут быть и более комплексными. Количественные определения содержания золота в первичных сульфидных и породообразующих минералах в гранитоидах могут обеспечить ключевую информацию в поведении золота в различных магматических процессах. Фундаментальное понимание поведения золота необходимо для оценки факторов, которые контролируют развитие интрузивно-связанных золотых месторождений.

Эксперименты продемонстрировали, что золото концентрируется сульфидными минералами в последовательности снижения концентраций: борнит > халькопирит > пирротин > пирит [35, 37, 38]. Эксперименты по системе пирротин–промежуточный твёрдый раствор (ISS)–гранитный расплав–Au при 850 °C и давлении 100 МПа показали, что золото предпочтительнее сепарируется в ISS, чем в пирротин [37]. Эксперименты при 700 °C и 140 МПа продемонстрировали, что пирит может содержать до 6 г/т в Au-насыщенных хлоридных растворах [35] в противоположность халькопириту (3000 г/т Au), пирротину (~9 г/т Au) и магнетиту (~3 г/т Au) [38]. Магнетит может содержать 3 г/т Au, в то время как кварц содержит только 0,5 г/т Au в Au-насыщенных, серой обеднённых системах водные пары–рассол–силикатный расплав при 800 °C, давлении 140 МПа и в присутствии NNO буфера [44]. Действительно, золото предпочтительно концентрируется в халькопирите, арсенопирите, пирротине и пирите в большинстве гидротермальных золотых месторождениях и в сульфидах [45, 46]. Помимо указанных сульфидов, золото в максимальных концентрациях отмечено в халькозине (от 1500 до 4500 г/т) руд Синюхинского и Ульменского золото-медно-скарновых месторождений Горного Алтая [14, 47]. В гранитоидах юго-западного Нью Брансвика золото концентрируется в пиритах в количествах от <0,02 до 21 г/т [48]. Намного меньшие вариации концентраций золота в тех же гранитах отмечены для пирротина (от <0,02 до 0,34 г/т), чем для пирита [48].

Золото обычно встречается как микровключения в минералах в условиях пересыщения золота в растворах [49]. Золото и мышьяк близко связаны в мышьяковистом пирите с линейным взаимоотношением: $c_{\text{Au}} = 0,02c_{\text{As}} + 4 \cdot 10^{-5}$ (где c_{Au} и c_{As} — концентрации золота и мышьяка, соответственно). Твёрдые растворы золота (Au^+) входят в арсенопирит, замещающая Fe^{2+} [50, 51]. Рентгеновским адсорбционным анализом и вторичным ионным масс-спектрометрическим анализом As-содержащего пирита уста-

новлено, что твёрдые растворы золота существуют в двух координациях: Au^0 и Au^+ . При этом Au^+ может встречаться в мышьяковистом пирите в двух формах, включая Au^+ в вакансиях неизученных комплексов $\text{Au}-\text{As}-\text{S}$ и дефектах структуры в октаэдрической позиции [52]. Если механизм, при котором комплексы $\text{Au}(\text{HS})$ и и адсорбируются на поверхностях роста пирита, является возможным, то вхождение золота в мышьяковистый пирит зависит от вакансий в пирите и дефектов поверхности кристаллов пирита [53].

Экспериментальные и эмпирические данные подтверждают, что сульфидные минералы аккумулируют почти всё золото из расплавов гранитного состава. Подтверждено, что насыщение серой расплава является ключевым фактором, контролирующим поведение золота в магматических системах. Золото является несовместимым элементом в магме, пока расплав не насыщен серой. И только по достижению серой критической точки насыщения расплава, поведение золота становится совместимым в расплавах гранитоидных магм. Распределение золота в системе сульфиды–расплав $D_{\text{Au}}^{\text{Sulfide/melt}}$ является функцией $T-P-X-f\text{O}_2$ [54], и дальнейшими экспериментами показано, что возможность оценки $D_{\text{Au}}^{\text{Sulfide/melt}}$ зависит от указанных термодинамических параметров (температуры, давления, состава расплава, фугитивности кислорода).

Главными факторами, воздействующими на растворение серы в расплавах, являются источник магмы, температура, давление, состав расплава, редокс потенциал и диффузия серы [39–43, 55]. Источниками серы считаются факторы, контролирующие насыщение серой родоначальных магм. Уменьшение температуры и давления вызывает снижение растворимости серы, если фугитивность кислорода остаётся постоянной [39, 40], хотя влияние давления нуждается в пересмотре [41]. Фельзические магмы с низким содержанием железа характеризуются более низкой растворимостью серы сравнительно с мафическими составами [39, 56]. Сульфиды доминируют в расплавах при редуцированных (восстановленных) условиях ($f\text{O}_2$ ниже кварц-фаялит-магнетитового (QFM) буфера), в то время как сульфатная форма серы преобладает при относительно окисленных условиях ($f\text{O}_2$ выше QFM+2 буфера) [40].

Особенности поведения серы в расплаве и дегазация, вероятно, контролируется диффузией серы [57]. Смешение магм различного состава (например, мафической с фельзической) может привести к образованию гибридной мафической магмы, насыщенной серой [29]. Аналогично контаминация супракристалльным материалом мафических магм может привести к раннему насыщению серой [58]. Такая контаминация корового материала особенно заметна и действенна при генерации золото-чёрносланцевое оруденения (месторождения Мурунтау, Бакырчик и другие), где гранитоидные магмы шошонитового и адакитового типов, контаминируя сланцы с повышенным содержанием серы и угле-

родистого материала, приобретают свойства сильно восстановленных систем. Они обогащаются флюидами с высокими концентрациями сульфидной серы, селекционирующей золото из генерирующего очага.

Термодинамические условия поведения золота в расплавах ($T-P-f\text{O}_2$) были изучены К. Янгом с соавторами для различных золотоносных гранитоидов Нью Брансвика (Канада), которые суммированы на рис. 3 [48, 59, 60]. Этими авторами установлено, что гранитоиды шошонитовой серии имеют более высокие температуры кристаллизации, чем гранитоиды I-типа. Однако последние и редуцированные шошонитовые гранитоиды имеют более низкие значения фугитивности ($f\text{O}_2$), чем в нормальных окисленных гранитоидах (рисунок).

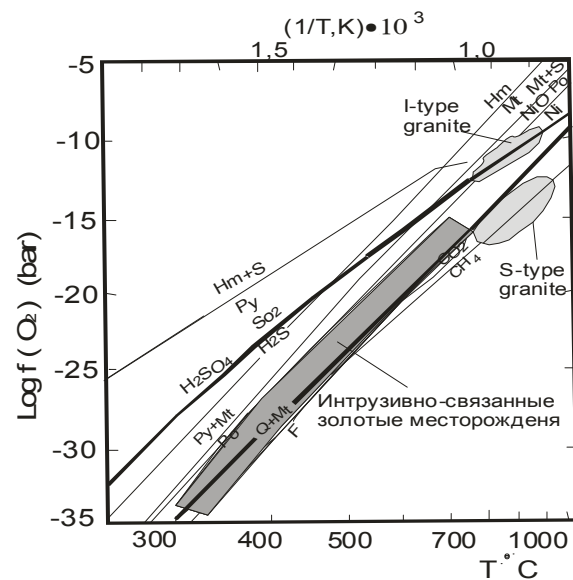


Рисунок. Диаграмма температура–фугитивность кислорода для I- и S-типов гранитоидов и интрузивно-связанных золоторудных месторождений, скомпилированная по [19, 61]. Шкала температур логарифмическая

Тонкими линиями показаны $f\text{O}_2$ – T условия для редокс буферов Hm-Mt (гематит-магнетитового), N-NO (никель-бунзенитового), Q-Mt-F (кварц-магнетит-фаялитового), Mt-S-Po (магнетит-серапирротитового), Py-Mt-Po (пирит-магнетит-пирротитового). Толстыми линиями показаны отношения мольных долей $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}=1$ и $\text{H}_2\text{S}/\text{HSO}_4=1$, $\text{SO}_2/\text{HSO}_4=1$ и CO_2/CH_4 при давлении $P_{\text{общ.-флюид}}=100$ МПа.

Группа исследователей [62] на основе проведения тонких геохимических исследований рудогенерирующих интрузивных образований Пуал Ридж пришла к выводу, что ассоциация крупных Au-Cu-Ag месторождений в конвергентных окраинах является главным атрибутом высокого содержания халькофильных элементов в родоначальных мантийных магмах, генерированных в субдукционных зонах относительно окисленных мантийно-производных пород от базальтоидов до риолитов. Установлено, что инициальные количества основных (Cu, Pb, Zn и других) и благородных металлов в ро-

дональных базальтах изученной островной дуги Пуал Ридж близки концентрациям в срединно-океанических хребтах (Middle Ocean Ridge Basalts – MORB), потому что, вероятно, MORB являются не насыщенными сульфидной фазой, которая является следствием их более окисленного состояния, чем MORB. Поведение S в процессе эволюции магм островной дуги Пуал Ридж является неясным только в поздней стадии потери SO_2 в процессе излияний на дно, но авторами показано, что это может подразумевать использование Se как заменителя S, так как селен близок сере по особенностям миграции с серой в процессе магматической эволюции, за исключением условий дегазации при низком давлении вблизи морского дна.

Выявлено, что пик магнетитового фракционирования при 60 вес. % SiO_2 и магнезиального числа (Mg#) ~40 сопровождается уменьшением содержания Au, Cu и Ag, обусловленным отделением (сепарацией) Cu-Au-обогащённых флюидов, которые также содержат Se, подтверждая факт, что фракционирование магнетита в базальтоидных расплавах является триггерным механизмом их сульфидного насыщения. Петрологическое моделирование обнаруживает, что даже небольшое количество фракционированного магнетита является достаточным для превращения большей части S, первоначально растворённой в магме, в сульфат (SO_4^{2-}), а затем в сульфид (S^{2-}), триггируя насыщение в Cu-обогащённую сульфидную фазу, экспериментально идентифицированную как борнит (Cu_5FeS_4). Эта сульфидная фаза секвестрирует золото и серебро, и элементы той же самой валентности, такие как Ni, Re, Pt, которые подтверждают, что эта фаза кристаллизуется скорее, чем несмешиваемый сульфидный расплав. Ассоциация главных медно-золотых месторождений в связи с магмами конвергентных окраин обусловлена специфическими процессами магматической эволюции при окислительных условиях. Такой механизм приводит такие подобные расплавы к фракционированию магнетита, триггируя насыщение расплава сульфидной серой в медно-обогащённых сульфидах.

В эту же самую стадию фракционирования магнетита происходит уменьшение P_2O_5 и Sr (при ~60 вес. % SiO_2), указывая на то, что в это же время происходит насыщение апатитом. Эта взаимосвязанная картина фракционирования и насыщения последующих расплавов апатитом выявлена в аналогичных магмах соседнего островодужного Басейна Восточного Мануса [62].

Выводы

1. В заключение следует отметить, что предпочтительная связь золотого оруденения намечается для восстановленных плутонов, становление которых связано со значительной контаминацией углеродистого материала, где золото ведёт себя как несовместимый элемент в кислых расплавах. При этом золото будет накапливаться в заключительных фазах становления редуцированных плутонов и во флюидной фазе, что приводит к формированию концентрированного оруденения золота. Окислительная обстановка (окисленные плутоны) не приводит к концентрации золота в остаточных флюидах и не способствует образованию концентрированного оруденения золота. Важное значение в оценке золотоносности гранитоидов имеют особенности состава гранитоидов и взаимоотношения $D_{\text{Au}}^{\text{Sulfide/melt}}$ химического состава расплавов, T – P – $f\text{O}_2$ и другие параметры, определяющие особенности поведения и отделения золота из расплавов.
2. Петрологическое моделирование на основе геохимических данных по фракционированию магнетита в эволюции островодужных расплавов базальтоидной магмы при фракционировании магнетита несколько увеличивает восстановленность более кислых расплавов (с содержаниями SiO_2 выше 60 вес. %) за счёт удаления магнетита из расплава.
3. Петрологическое моделирование подтверждает обогащённость многих месторождений золота и меди элементами платиновой группы в островодужных относительно кислых гранитоидных магмах, прошедших стадию фракционирования магнетита в расплавах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Müller D., Groves D.I. Direct and indirect association between potassic igneous rocks, shoshonites and goldcopper deposits // *Ore Geol. Review*. – 1993. – V. 8. – P. 383–406.
2. Candela P.A. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals // *Journal Petrol.* – 1997. – V. 38. – P. 1619–1633.
3. Kesler S.E., Chrysosoulis S.L., Simon G. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate // *Ore Geol. Review*. – 2002. – V. 21. – P. 103–124.
4. Маракушев А.А. Геохимические особенности золота в условиях его эндогенной концентрации // *Геохимия золота*. – Владивосток: Изд-во «Владос», 1978. – С. 23–39.
5. Рябчиков И.Д., Ефимов А.Е., Кулагин В.М., Шилин Н.А. Физико-химический анализ поведения золота в процессе дегазации магм // *Проблемы геохимии эндогенных процессов*. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 14–18.
6. Диман Е.Н., Олейников Б.В. О коэффициентах распределения золота между расплавом, флюидом и твёрдой фазой // *Методы экспериментальных исследований гидротермальных равновесий*. – Новосибирск: Наука, 1979. – С. 147–157.
7. Коробейников А.Ф., Миронов А.Г. Геохимия золота в эндогенных процессах и условия формирования золоторудных месторождений. – Новосибирск: Наука, 1992. – 217 с.
8. Коробейников А.Ф., Зотов И.А. Закономерности формирования месторождений золото-скарновой формации. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 235 с.
9. Ishihara S. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks // *Min. Geol.* – 1977. – V. 27. – P. 293–305.
10. Thompson J.F.H., Sillitoe R.H., Baker T., Lang J.R., Mortensen J.K. Intrusion-related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // *Miner. Deposita*. – 1999. – V. 34. – P. 323–334.

11. Thompson J.F.H., Newberry R.J. Gold deposits related to reduced granitic intrusions // *Society of Economic Geologists, Reviews* 13. – 2000. – P. 377–400.
12. Hart C.J.R., Mair J.L., Goldfarb R.J., Groves D.I. Source and redox controls of intrusion-related metallogeny, Tombstone-Tungsten Belt, Yukon, Canada // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*. – 2005. – V. 95. – P. 339–356.
13. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // *Econ. Geol.* – 2006. – V. 101. – № 7. – P. 1415–1427.
14. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и Горной Шории. – Gamburg: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 370 с.
15. Коробейников А.Ф., Гусев А.И., Красова А.С. Восстановленные интрузивно связанные золоторудные системы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 45–52.
16. Ishihara S. The granitoid Series and mineralization // *Econ. Geology* 75th Anniversary Volume. – 1981. – P. 458–484.
17. Ishihara S., Kimura K., Ohta K., Sato T. Content of gold in Japanese granitoids: preliminary results // *Kodzan Tisitu*. – 1985. – V. 35. – № 4. – P. 295–298.
18. Leveille R.C.A., Newberry R.J., Bull K.F. An oxidation state-alkalinity diagram for discrimination some gold-favorable plutons: An empirical and phenomenological approach // *Geological Society of America Abstracts with Programs*. – 1988. – V. 20. – P. 142.
19. McCoy D., Newberry R.J., Layer P., Marchi J.J., Bakke A., Mastermann J.S., Minehane D.L. Plutonic-Related Gold Deposits of Interior Alaska // *Econ. Geology Monograph*. – 1997. – V. 9. – P. 191–241.
20. Коробейников А.Ф. Золото в аксессуарных минералах интрузивных пород // *Геохимия*. – 1980. – № 8. – С. 1183–1197.
21. Shannon R.D., Prewitt C.T. Effective ionic radii in oxides and fluorides // *Acta Crystall.* – 1969. – V. 25. – № 8. – P. 925–945.
22. Rosa D.R.N. The incompatible behavior of gold in reduced magmas; a working hypothesis // *Comunicações Geológicas*. – 2005. – V. 92. – P. 75–78.
23. Миронов А.Г., Жмодик С.М. Отложение золота в сульфидах на основе данных ауторадиографического использования радиоизотопа Au¹⁹⁵ // *Геохимия*. – 1980. – № 7. – С. 985–991.
24. Hervig R.L., Mazdab F.K., Danielson L., Sgarp T.G., Hamed A., Williams P. SIMS microanalyses for Au in silicates // *Amer. Mineral.* – 2004. – V. 89. – P. 498–504.
25. Pettke T., Halter W.E., Webster J.D., Aigner-Torres M., Heinrich C.A. Accurate quantification of melt inclusion chemistry by LA-ICPMS: a comparison with EMP and SIMS and advantage and possible limitations of these methods // *Lithos*. – 2004. – V. 78. – P. 333–361.
26. Halter W.E., Pettke T., Heinrich C.A., Rothen-Rutishauer B. Major to trace element analysis of melt inclusions by laser-ablation ICP-MS: methods of quantification // *Chem. Geol.* – 2002. – V. 183. – P. 63–86.
27. Halter W.E., Heinrich C.A., Pettke T. Magma evolution and formation of porphyry Cu-Au ore fluids: evidence from silicate and sulfide melt inclusions // *Mineral Deposita*. – 2005. – V. 39. – P. 845–863.
28. Cabri L.J., Sylvester P.J., Tubrett M.N., Peregoedova A., Laflamme J.H.G. Comparison of LAM-ICP-MS and micro PIXE results for palladium and rhodium in selected samples of Noril'sk and Talnakh sulfides // *Canadian Mineral.* – 2003. – V. 41. – P. 321–329.
29. Keith J.D., Whitney J.A., Hattori K., Ballantyne G.H., Christiansen E.H., Barr D.L., Cannan T.M., Hook C.J. The role of magmatic sulfides and mafic alkaline magmas in the Bingham and Tintic districts, Utah // *Journ. Petrol.* – 1997. – V. 38. – P. 1679–1690.
30. Vaughan D.J., Craig J.R. Sulfide ore mineral stabilities, morphologies, and intergrowth textures. *Geochemistry of Hydrothermal ore deposits*. – New York: The Pennsylvania State University, 1997. – P. 367–434.
31. Borrok D., Kesler S.E., Vogel T.A. Sulfide minerals in intrusive and volcanic rocks of the Bingham-Park City belt, Utah // *Econ. Geol.* – 1999. – V. 94. – P. 1213–1230.
32. Larocque A.C.L., Stimac J.A., Keith J.D., Humminick M.A.E. Evidence for open-system behavior in immiscible Fe-S-O liquids in silicate magmas: implications for contributions of metals and sulfur to ore-forming fluids // *Can. Mineral.* – 2000. – V. 38. – P. 1233–1249.
33. Whitney J.A., Stormer J.R. Jr. Igneous sulfides in the Fish Canyon tuff and the role of sulfur in calc-alkaline magmas // *Geology*. – 1983. – V. 11. – P. 99–102.
34. Shaw C.S.J. Origin of sulfide blebs in variably metasomatized mantle xenoliths, Quaternary West Eifel volcanic field, Germany // *Can. Mineral.* – 1997. – V. 35. – P. 1453–1463.
35. Cygan G.L., Candela P.A. Preliminary study of gold partitioning among pyrrhotite, pyrite, magnetite, and chalcopyrite in gold-saturated chloride solutions at 600 to 700 °C, 140 MPa (1400 bar) // *Magma, Fluid, and Ore Deposits, Short Course Series*. – 1995. – V. 23. – P. 129–137.
36. Candela P.A. A review of shallow, ore-related granites: textures, volatiles, and ore metals // *Journal Petrol.* – 1997. – V. 38. – P. 1619–1633.
37. Jugo P.J., Candela P.A., Piccoli P.M. Magmatic sulfides and Au: Cu ratios in porphyry deposits: an experimental study of copper and gold partitioning at 850 °C, 100 MPa in a haplogranitic melt–pyrrhotite–intermediate solid solution–gold metal assemblage, at gas saturation // *Lithos*. – 1999. – V. 46. – P. 573–589.
38. Simon G., Kesler S.E., Essene E.J. Gold in porphyry copper deposits: experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400 to 700 °C // *Economic Geology*. – 2000. – V. 95. – P. 259–270.
39. Poulson S.R., Ohmoto H. An evaluation of the solubility of sulfide sulfur in silicate melts from experimental data and natural samples // *Chem. Geol.* – 1990. – V. 85. – P. 57–75.
40. Carroll M.R., Webster J.D. Solubilities of sulfur, noble gases, nitrogen, chlorine, and fluorine in magmas // *Rev. Miner.* – 1994. – V. 30. – P. 231–279.
41. Holzheid A., Grove T.L. Sulfur saturation limits in silicate melts and their implications for core formation scenarios for terrestrial planets // *Amer. Mineral.* – 2002. – V. 87. – P. 227–237.
42. O'Neill H.St.C., Mavrogenes J.A. The sulfide capacity and the sulfur content at sulfide saturation of silicate melts at 1400 °C and 1 bar // *Journ. Petrol.* – 2002. – V. 43. – P. 1049–1087.
43. Clemente B., Scailliet B., Pichavant M. The solubility of sulphur in hydrous rhyolite melts // *Journ. Petrol.* – 2004. – V. 45. – P. 2171–2196.
44. Simon G., Pettke T., Candela P.A. Experimental determination of Au solubility in rhyolite melt and magnetite: constraints on magmatic Au budgets // *American Mineralogist*. – 2003. – V. 88. – P. 1644–1651.
45. Morey A.A., Tomkins A.G., Bierlein F.P. Bimodal distribution of gold in pyrite and arsenopyrite: examples from the Archean Boorara and Bardoc shear systems, Yilgarn Craton, Western Australia // *Economic Geology*. – 2008. – V. 103. – № 6. – P. 599–614.
46. Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C. Gold and trace element zonation in pyrite using a Laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits // *Economic Geology*. – 2009. – V. 104. – P. 636–668.
47. Гусев А.И. Петрология золотогенерирующего магматизма. – М.: Изд-во ПАЕ, 2012. – 160 с.
48. Yang X.M., Lentz D.R., Sylvester P.J. Gold contents of sulfide minerals in granitoids from southwestern New Brunswick, Canada // *Miner. Deposita*. – 2006. – V. 41. – P. 369–386.
49. Reich M., Kesler C.S., Utsunomiya S. Solubility of gold in arsenian pyrite // *Geochim. et Cosmochimica Acta*. – 2005. – V. 69. – P. 2781–2796.
50. Tamocai C.A., Hattori K., Cabri L.J. «Invisible» gold in sulfides from Campbell mine, Red Lake greenstone belt, Ontario: evidence for mineralization during the peak of metamorphism // *The Canadian Mineralogist*. – 1997. – V. 35. – P. 805–815.

51. Cabri L.J., Newville M., Gordon R.A. Chemical speciation of gold in arsenopyrite // *The Canadian Mineralogist*. – 2000. – V. 38. – P. 1265–1281.
52. Simon G., Kesler S.E., Chrysosilis S. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: implications for deposition of gold in Carlin-type deposits // *Econom. Geology*. – 1999. – V. 94. – P. 405–422.
53. Widler A.M., Seward T.M. The adsorption of gold (I) hydrothermal complex by iron sulphide surfaces // *Geochim. et Cosmochimica Acta*. – 2002. – V. 66. – P. 383–402.
54. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. – London: Longman Group UK Ltd, 1993. – 353 p.
55. Li C., Repley E.M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits // *Miner. Deposita*. – 2005. – V. 40. – P. 218–230.
56. Frezotti M.L. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: application to petrology // *Lithos*. – 2001. – V. 76. – P. 273–299.
57. Baker L.L., Rutherford M.J. Sulfur diffusion in rhyolite melts // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1996. – V. 123. – P. 335–344.
58. Lesher C.M., Burnham O.M., Keays R.R., Barnes S.J., Hulbert L. Geochemical discrimination of barren and mineralized komatiites in dynamic ore-forming magmatic system // *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration, short course notes*. – 1999. – V. 13. – P. 450–477.
59. Yang X.M., Lentz D.R., Chi G., Thome K.G. Petrochemical characteristics of gold-related granitoids in southwestern New Brunswick, Canada // *Explor. Min. Geol.* – 2004. – V. 31. – P. 34–47.
60. Yang X.M., Lentz D.R. Chemical composition of rock-forming minerals in gold-related granitoid intrusions, southwestern New Brunswick, Canada: implications for crystallization conditions, volatile exsolution and fluorine-chlorine activity // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 2005. – V. 150. – P. 287–305.
61. Lang J.R., Baker T. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding // *Miner. Deposita*. – 2001. – V. 36. – P. 477–489.
62. O'Neill H.St. C., Arculus R.J., Mavrogenes J.A. The magnetite crisis in the Evolution of Arc-related Magmas and Initial Concentrations of Au, Ag and Cu // *Journal of Petrology*. – 2010. – V. 51. – № 12. – P. 1432–1451.

Поступила 22.11.2012 г.

УДК 553.984;552.54

ВЛИЯНИЕ ГЕРЦИНСКОГО СКЛАДКООБРАЗОВАНИЯ НА СОХРАННОСТЬ ПАЛЕОЗОЙСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ГЕОСИНЕКЛИЗЫ

А.Е. Ковешников

Томский политехнический университет
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН
E-mail: Kovesha@mail.ru

При анализе мощностей карбонатных отложений Западно-Сибирской геосинеклизы обращает на себя внимание тот факт, что увеличение мощности известняков соответствует трем крупным фрагментам доюрского фундамента, что, вероятно, имеет связь с проявлением герцинской складчатости, так как контуры выделенных областей повышенной мощности известняков имеют определенные параллели с соответствующими границами крупных тектонических блоков, таких как Русская платформа и Восточная Сибирь. Эти участки можно считать синклиниями. Незначительная мощность палеозойских отложений на сопредельных участках связана с тем, что это антиклинории, здесь палеозойские отложения при осуществлении герцинской складчатости были приподняты и в значительной степени разрушены процессами выветривания в континентальный период развития региона. Эти антиклинории сложены породами, в значительной степени преобразованными процессами прогрессивного и особенно прогрессивного эпигенеза, в то время как палеозойские отложения в пределах синклинориев в период герцинской складчатости испытали незначительное поднятие и их преобразование процессами регрессивного эпигенеза незначительно.

Ключевые слова:

Доюрские карбонатные породы, Западно-Сибирская геосинеклиза, герцинская складчатость, синклинорий, антиклинорий, регрессивный эпигенез.

Key words:

Prejurassic carbonate rocks, Western-Siberian geosineclise, Hercynian orogeny, synclinorium, anticlinorium, regressive epigenesis.

Палеозойские отложения, развитые на территории Западно-Сибирской геосинеклизы на основании изучения их вещественного состава, особенностей формирования и распространения, в настоящее время подразделены на 23 структурно-фациальных района (рис. 1). Проведенный нами анализ мощностей позволил выделить отдельные, пространственно совмещенные участки, на которых мощность палеозойских отложений значительна, и территории, на которых эти отложения представлены в ограниченном объеме.

Если подсчитать мощность известняков и доломитов, слагающих палеозойский разрез, то и эти показатели отражают выявленные при первичном подсчете закономерности. Картина развития как палеозойских образований в целом, так и известняков и доломитов суммарно представляется в следующем виде (таблица).

Синклинории и антиклинории

Если прорисовать контуры территорий, на которых мощность карбонатных пород в палеозойском